

Kupfer-Verbundwerkstoffe für passive Kühlkörper in der Elektronik

Schubert, T.; Weidmüller, H.; Weißgärber, T.; Kieback, B. (1)

Die derzeitige Tendenz der technischen Entwicklung ist weltweit gekennzeichnet durch den immer breiteren Einsatz elektronischer Bauteile. Sowohl die signalverarbeitende Mikroelektronik als auch die Leistungselektronik mit Systemen zur Steuerung oder Umwandlung elektrischer Leistungen wie Schalter, Treiber, Endstufen, Netzteile und Umrichter sind von dieser rasanten Entwicklung betroffen. Auch im Bereich der Optoelektronik haben Diodenlaser in den vergangenen Jahren beachtliche Leistungssteigerungen erfahren, so dass zahlreiche industrielle Anwendungen solcher Strahlquellen mit optischen Leistungen bis zu 9.000 W entstanden (z.B. Metall- und Kunststoff-Schweißen im Automobilbau). Diese Fortschritte werden stets durch eine Zunahme an integrierten Schaltkreisen, erhöhten Stromdichten oder Taktraten und zu einer höheren elektrischen Kontaktierungsdichte bei einer gleichzeitig Miniaturisierung der gesamten Einheit begleitet (Einsparung von teurem Halbleitermaterial). Dadurch wächst der Verlustwärmefluss mit jeder Leistungssteigerung einer elektronischen Einheit.

Aufgrund des Innenwiderstandes der halbleitenden Bauelemente führen hohe Ströme oder hohe Schaltfrequenzen zu einer Erwärmung. In [1] wird festgestellt, dass 55 % der elektronischen Ausfälle auf eine thermische Überbelastung am Halbleiter zurückzuführen sind. Für Siliziumhalbleiter liegen die Einsatztemperaturen bereits heute bei ca. 95 °C. Jede weitere Wärmezunahme am Bauteil reduziert dessen Zuverlässigkeit. Gemäß Bar-Cohen u.a. [2] wird die Zuverlässigkeit durch eine Temperaturerhöhung von 2 K um 10 % vermindert. In Tabelle 1 sind die spezifischen Verlustleistungen eines DSP (digitaler Signalprozessor) und eines leistungselektronischen IGBT-Bauelementes (Insulated Gate Bipolar Transistor) sowie von Haushaltanwendungen gegenübergestellt.

Es wird deutlich, dass das thermische Management das Schlüsselproblem des Packaging von Hochleistungshalbleitern darstellt.

Die hohen Wärmeflüsse erfordern eine auf die Wärmeabfuhr optimierte Package-architektur und eine verbesserte Kühlung, welche durch aktive Bauelemente oder durch passive Wärmeleiter realisiert werden kann.

Bei thermisch höher beanspruchten Bauelementen wie z.B. Verstärkern, Wandlern oder Laserdioden ist wegen der hohen Leistungen ein Verlöten der Halbleiterkomponenten mit

einem Substrat mit hoher Wärmeleitfähigkeit (Wärmesenke) erforderlich. Da Temperaturzyklen während der Bauteilmontage und des -betriebes nicht vermieden werden können, ist auch ein an den Halbleiter angepasster thermischer Ausdehnungskoeffizient (CTE) gefordert, um thermomechanischer Ermüdung und einem vorzeitigen Ausfall vorzubeugen. Reine Metalle mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit von ca. 400 W/(mK)

wie Kupfer oder Silber weisen einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von >16 ppm/K auf. Metalle mit einem geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von < 7 ppm/K wie Molybdän oder Wolfram haben dagegen nur eine Wärmeleitfähigkeit von < 170 W/(mK). Der CTE von Keramiksubstraten, meist Al₂O₃ mit 6,7 ppm/K oder AlN mit 4,5 ppm/K ist an den Halbleiter, vorwiegend Si mit 4,2 ppm/K oder GaAs mit 6,5 ppm/K angepasst. Die Keramiken besitzen jedoch relativ geringe Wärmeleitfähigkeiten.

Metallische Verbundwerkstoffe (MMCs – Metal Matrix Composites) bieten Möglichkeiten, eine hohe Wärmeleitfähigkeit mit einem geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu kombinieren. Auf einige wesentliche Entwicklungen soll im Folgenden eingegangen werden.

W-Cu- und Mo-Cu-Verbundwerkstoffe

Verbundwerkstoffe auf der Basis von Refraktärmetallen, wie Molybdän oder Wolfram, werden in der Regel durch pulvermetallurgische Methoden gefertigt. Entweder erfolgt die Herstellung durch Pressen und Sintern poröser Formkörper aus den Refraktärmetallen und anschließender Infiltration mit schmelzflüssigem Kupfer, oder die Metallpulvermischungen werden zu Formkörpern durch Pressen oder MIM (Metal Injection Molding)

Komponente	Glühlampe	Bügeleisen	DSP	IGBT
Leistungsabgabe	100 W	1000 W	30 W	270 W
Oberfläche	100 cm ²	200 cm ²	2 cm ²	2 cm ²
Wärmefluss	1 W/cm ²	5 W/cm ²	15 W/cm ²	135 W/cm ²

Tabelle 1: Wärmefluss von Haushaltanwendungen im Vergleich zu elektronischen Komponenten [3]

Material	Zusammensetzung Gew.-%	Dichte (g/cm ³)	CTE (ppm/K)	Wärmeleitfähigkeit bei 25 °C/100 °C (W/(mK))	E-Modul bei 20 °C (GPa)
R750	Cu: 30, Rest Mo	9,7	7,5	195/190	225
R990	Cu: 50, Rest Mo	9,5	9,9	250/240	172
Tungstar Typ III	Cu: 5, Rest W	17,5	5,1	171	309
Tungstar Typ III	Cu: 10, Rest W	16,95	5,8	188	292
T700	Cu: 10, Rest W	17,1	6,4	195/190	330
T725	Cu: 12, Rest W	16,8	6,7	210/200	320
T750	Cu: 15, Rest W	16,4	7,3	215/205	310
T800	Cu: 20, Rest W	15,5	8,3	235/225	280

Tabelle 2: Physikalische und mechanische Eigenschaften von Wärmesenkenwerkstoffen (Plansee AG, Osram Sylvania, Inc.) [6, 7].

verarbeitet und anschließend oberhalb des Schmelzpunktes von Kupfer gesintert (Flüssigphasensinterung). Dabei können sub- μ bis Nano-Pulver der Refraktärmetalle Mo und W die Sinterfähigkeit der Pulvermischungen erhöhen [4, 5].

Tabelle 2 zeigt typische physikalische und mechanische Eigenschaften handelsüblicher Verbundwerkstoffe für Wärmesenken im elektronischen Package.

Schichtverbunde zwischen Kupfer und den genannten Refraktärmetallen sind ebenfalls bekannt. Als weitere Entwicklung können die sog. ARM-Lamine (Advanced Refractory Metal) aufgeführt werden [6]. Diese Werkstoffverbunde sind beidseitig mit Reinkupfer plattierte Mo/Cu-Bleche, die durch Walzen von mit Kupfer infiltrierten Molybdänkörpern hergestellt werden. Die mögliche maximale Kupferschichtdicke wird hierbei durch den Verzug während

des Packagingprozesses bestimmt. Die Wärmeleitung ergibt sich zum einen durch die Wärmespreizung über das Kupfer mit 400 W/(mK) und zum anderen durch die Wärmeleitfähigkeit vom Mo/Cu-Verbundwerkstoff (z.B. R750 mit 195 W/(mK)). Durch ein an das Package optimal angepasstes ARM-Laminat konnten infolge der Reduzierung der Betriebstemperaturen Leistungssteigerungen von über 35 % am elektronischen Bauteil nachgewiesen werden [6].

Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Cu-Verbundwerkstoffe

Al/SiC gilt als Referenzmaterial, das die heutigen Forderungen mit einer Wärmeleitfähigkeit von maximal 230 W/(mK) und einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen 6 und 8 ppm/K gut erfüllt [8] (Bild 1).

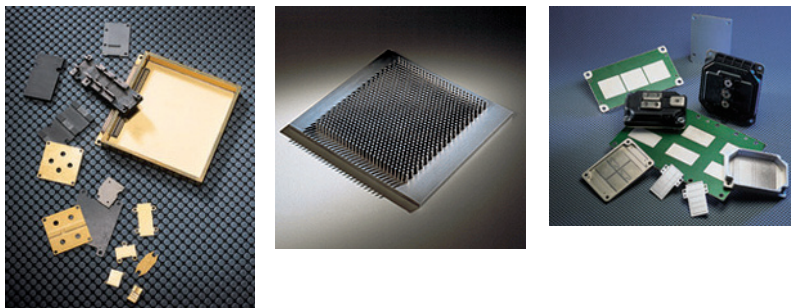


Bild 1: Grundplatten und Gehäusekomponenten für elektronische Bauteile aus Al/SiC [9, 10]

Es ist aber absehbar, dass in Zukunft Werkstoffe mit noch höheren Wärmeleitfähigkeiten benötigt werden. Dies kann einerseits durch den Einsatz höherleitfähiger Matrixwerkstoffe wie Kupfer (oder auch Silber) realisiert werden. Andererseits ist ein Ersatz von SiC durch eine höherleitfähige (und/oder sich geringer ausdehnende) Verstärkungskomponente denkbar. Eine Kombination beider Wege ist ebenfalls möglich. Wesentliche Entwicklungsziele neuartiger Verbundwerkstoffe (Bild 2) werden im Folgenden näher erläutert.

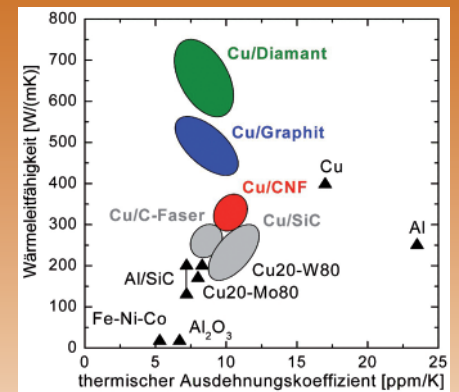


Bild 2: Ausgewählte Entwicklungsziele von neuen Verbundwerkstoffen für Wärmesenken im Vergleich zu herkömmlichen Werkstoffen

Kupfer-Kohlenstoff-Faser Verbundwerkstoffe

Kupfer-Kohlenstoff-Faser Verbundwerkstoffe zeichnen sich durch einen gut einstellbaren Ausdehnungskoeffizienten und eine hohe Wärmeleitfähigkeit aus [11-14]. Die heute meist verwendeten Kohlenstoff-Fasern sind entweder PAN- oder PITCH-Fasern. PAN-Fasern werden aus Polyacrylnitril hergestellt und besitzen einen niedrigen Ausdehnungskoeffizienten, eine niedrige Wärmeleitfähigkeit und eine hohe Festigkeit. PITCH-Fasern werden aus Teer hergestellt, haben einen höheren Kristallinitätsgrad und besitzen deshalb eine um Zehnerpotenzen höhere Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung und einen höheren Elastizitätsmodul. Der CTE ist für beide Faserarten leicht negativ (siehe Tabelle 3). Diese Eigenschaft ist

Fasername	Faserart	Hersteller	E-Modul	Therm. Leitf.	CTE	Dichte
			[GPa]	[W/(mK)]	ppm/K	[g/cm ³]
T300	PAN	Torayca	230	8	ca. -1,2	1,76
K13A10a	PITCH	Mitsubishi	790	220	ca. -1,4	2,15
K13C2U	PITCH	Mitsubishi	900	620	ca. -1,4	2,20
K-1100X	PITCH	Amoco	900-1000	950-1170	ca. -1,4	2,15-2,25

Tabelle 3: Beispiele von Kohlenstoff-Fasern

für die vorgesehene Anwendung des Verbundwerkstoffs als ausdehnungsangepasste Wärmesenke von besonderer Bedeutung. Des Weiteren ist die gute mechanische Bearbeitbarkeit des Materials bei der Bauteilfertigung von Vorteil. Die ausgeprägte Eigenschaftsanisotropie von Kohlenstoff-Fasern führt zu einer markanten Orientierungsabhängigkeit der Eigenschaften des Verbundwerkstoffes, die berücksichtigt werden muss.

Im pulvermetallurgischen Herstellungsprozess wird eine Mischung aus kurzen Kohlenstoff-Fasern und Kupferpulver heißgepresst. Anstelle der Mischung können auch verkupferte Kohlenstoff-Fasern eingesetzt werden. Der Volumenanteil an Kohlenstoff-Fasern muss je nach gewünschtem Ausdehnungskoeffizienten zwischen 40 Vol.-% und 45 Vol.-% liegen. Die thermische Leitfähigkeit wird vor allem von der Faserleitfähigkeit (Faserart) und der Faserorientierung, aber auch vom Volumenanteil der Fasern beeinflusst. Mit höherleitenden Spezialfasern (z.B. K1100 mit

1.100 W/(mK)) sind thermische Leitfähigkeiten von mehr als 300 W/(mK) in der Ebene quer zur Heißpressrichtung realisierbar (bei 44 Vol.-% Fasern und einem Ausdehnungskoeffizienten von 6 ppm/K, Bild 3).

Weiterführende F&E-Arbeiten beschäftigen sich derzeit mit der Verbesserung der Grenzflächenhaftung zwischen Cu-Matrix und C-Faser. Aufgrund der geringen Haftfestigkeit im „reinen“ Cu/C-System können Temperaturzyklen zu einer allmählichen Degradation der Verbundwerkstoffe führen, was die Substratdelamination des Halbleiterelementes vorantreibt. Die Verwendung von PVD-beschichteten Fasern bzw. die Nutzung haftvermittelnder Zwischenschichten auf Basis von Cr oder Ti erscheinen hierbei erfolgversprechend [15].

Interessant sind Bestrebungen, MMC's mit Carbon Nanofasern oder -tubes (CNF/CNT) herzustellen. In aktueller Literatur wird von außergewöhnlichen Eigenschaften wie extrem hoher

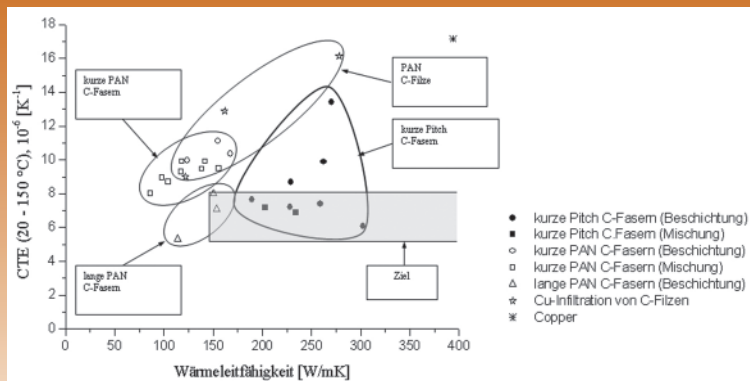


Bild 3: Thermophysikalische Eigenschaften verschiedener Cu/C-Faser Werkstoffe (gemessen in der Ebene der Faserausrichtung) [22]

E-Modul (etwa 1 TPa), hohe Wärmeleitfähigkeit (ca. 2.000 W/(mK)), hohe Zugfestigkeit und niedrigere Dichte als herkömmliche C-Fasern (etwa 1,4 g/cm³) berichtet. Die bisherigen Schwierigkeiten bestanden einerseits in der Herstellung der Fasern in ausreichender Menge und Qualität zu einem akzeptablen Preis, andererseits in technologischen Problemen der homogenen Einbettung höherer Volumenanteile dieser Fasern in eine Metallmatrix [16, 17].

Partikelverstärkte Verbundwerkstoffe

Auf eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit sind auch zahlreiche Aktivitäten zur Kombination von Cu- bzw. Ag-Matrices mit z.B. SiC- oder Diamantpartikeln ausgerichtet [18-25]. Die Herstellung von Cu/SiC Verbundwerkstoffen ist durch Mischen mit anschließendem Kompaktieren durch Heißpressen oder HIP möglich [26, 27]. Eine Optimierung der SiC-Partikelgrößenverteilung ist jedoch zur vollständigen Verdichtung bei den notwendig hohen SiC-Anteilen

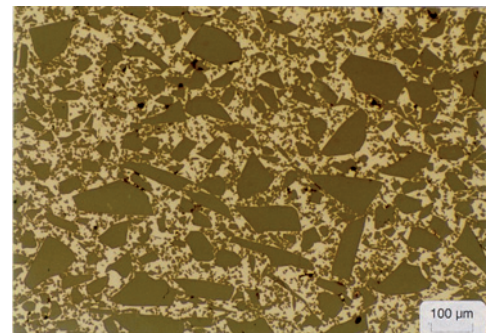


Bild 4: Lichtmikroskopische Darstellung des Gefüges eines Cu/SiC Verbundwerkstoffes mit 70 Vol.-% SiC

von 50 -70 Vol.-% erforderlich. Bild 4 zeigt ein typisches Gefüge eines Cu/SiC Verbundwerkstoffes mit 70 Vol.-% SiC.

Um hohe mechanische und thermophysikalische Eigenschaften zu erreichen, ist es erforderlich, die Grenzflächenfestigkeit zu erhöhen. Dies ist durch die Zugabe von geringen Mengen an Legierungselementen, wie z.B. Cr, Ti oder Mg möglich. Bisher erzielte

Material	Zusammensetzung Gew.-%	Dichte (g/cm ³)	CTE (ppm/K)	Wärmeleitfähigkeit bei 25°C/100°C (W/(mK))	E-Modul bei 20°C (GPa)
Cu/40SiC	Cu: 60 Rest SiC	6,6	11,0	320	200
CuMg/60SiC	Cu: 39,7 Mg: 0,3 Rest SiC	5,5	9,9	210	235

Tabelle 4: Ausgewählte Eigenschaften von Cu/SiC-Verbundwerkstoffen

Eigenschaften sind in Tabelle 4 dargestellt. Problematisch sind Si-Verunreinigungen in der Cu-Matrix, deren Vermeidung durch technologische Parameter und/oder Legierungszusammensetzung Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten ist.

Höherleitfähige Verstärkungsphasen als Siliziumkarbid wurden ebenfalls zur Herstellung partikelverstärkter MMC's verwendet.

Aufgrund des Bindungsverhaltens der Kohlenstoffatome weisen Diamant und Graphit Wärmeleitfähigkeiten

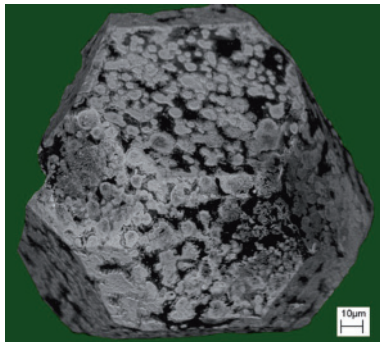


Bild 5: Carbidbildung zum Interfacedesign in Cu-Diamant-Verbundwerkstoffen (rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (BSE-Signal) eines Diamanten nach Herauslösen aus dem CuCr-Diamant-Verbundwerkstoff)

von 1.500 - 2.000 W/(mK) auf, wobei der thermische Ausdehnungskoeffizient im Bereich von 0 - 1 ppm/K liegt. Teilchenverbundwerkstoffe sind in ihren Eigenschaften mehr oder weniger isotrop. Im Gegensatz hierzu sollte es bei den Graphitwerkstoffen möglich sein, durch gerichtete Konsolidierungsmethoden anisotrope Eigenschaften hinsichtlich der

Wärmeleitung und der thermischen Ausdehnung zu realisieren. Derartige Verbundwerkstoffe mit gerichteten Kühleigenschaften werden in zukünftigen elektronischen Anwendungen mit 3-dimensionalem Package-Aufbau ebenfalls eine verstärkte Rolle spielen.

Bisherige Untersuchungen am System Kupfer/Diamant mit > 40 Vol.-% Diamantanteil zeigen, dass Wärmeleitfähigkeiten von über 600 W/(mK) bei einem reduzierten thermischen Ausdehnungskoeffizienten von < 10 ppm/K realisierbar sind. Das optimale Grenzflächendesign erfolgt hierbei über eine Chrom- bzw. Bor-Carbid-Bildung (Bild 5), wobei verfahrens- und legierungstechnische Parameterfenster einzuhalten sind [25, 28].

Ein Vergleich bisher erzielter Eigenschaften derartiger partikelverstärk-

ter Verbundwerkstoffe auf metallischer Basis zeigt, dass diese bei Verwendung sehr leistungsfähiger Verstärkungsphasen, wie Diamant oder Naturgraphit hinsichtlich der Kombination von Wärmeleitfähigkeit und CTE gegenüber herkömmlichen Wärmesenkenmaterialien deutlich hervortreten.

Verbundwerkstoffe mit PCM

PCMs (Phase Change Materials) sind salzartige Verbindungen oder Paraffine, die während ihres Fest-Flüssig-Phasenübergangs enorme Mengen an Schmelzwärme aufnehmen und wieder reversibel abgeben können. Diese Materialien erlauben es, bei diskreten Schmelztemperaturen Latentwärmern von 150 - 250 KJ/kg zu absorbieren und werden daher zur Speicherung von Kraftwerksabwärme aber auch von solarer Wärme verwendet (Bild 6).

Da die typischen PCMs Schmelztemperaturen im Bereich von -15 °C bis 190 °C aufweisen, sind diese Verbindungen ebenfalls für die Kühlung bzw. Temperierung von elektronischen Bauteilen äußerst interessant. Derartige Werkstoffe sollten dabei eine hohe Wärmeleitung, aber gleichzeitig eine hohe Wärmekapazität besitzen. Metalle wie Kupfer oder Aluminium zeigen einerseits eine hohe Wärmeleitfähig-

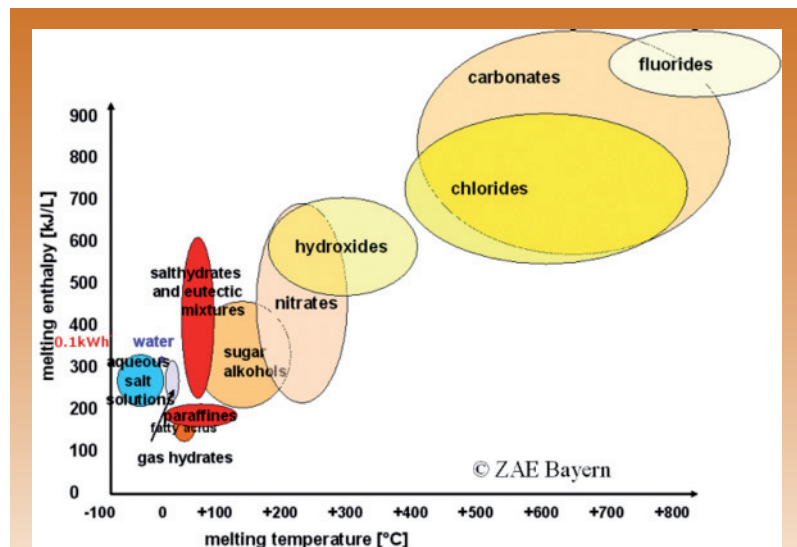


Bild 6: Überblick und Anwendungsbereiche von PCMs [29]

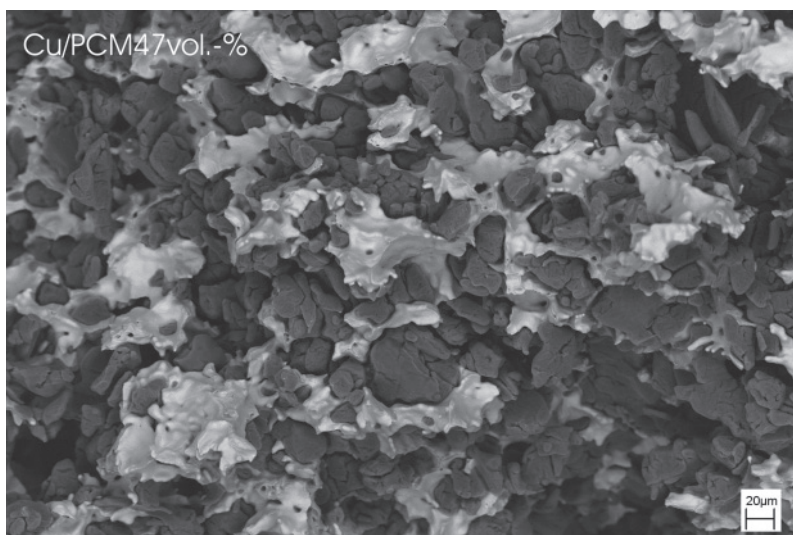


Bild 7: Bruchfläche eines vollständig mit PCM infiltrierten gesinterten Kupfergerüsts

keit, jedoch andererseits eine sehr geringe Wärmekapazität. Eine Kombination mit PCMs in Form eines Metall-Matrix-Verbundwerkstoffes realisiert die gewünschten Eigenschaften. Solche neuartigen Verbundwerkstoffe könnten zum einen der Glättung von bzw. dem Schutz vor auftretenden Temperaturspitzen, verursacht durch zyklische Schaltvorgänge von Leistungselektronik, dienen. Zum anderen verhindern sie durch ihre kapazitiven Eigenschaften starke Temperaturschwankungen der zu schützenden elektronischen Komponenten und beugen thermischen Spannungen im Package vor. Derartige Untersuchungen werden derzeit am IFAM Dresden in einer von der International Copper Association (ICA) finanziell unterstützten einjährigen Experimentalstudie durchgeführt. Der entscheidende Entwicklungsbedarf besteht in der Herstellung eines feinporösen metallischen Gerüsts mit hoher Wärmeleitfähigkeit über pulvermetallurgische Technologien (Bild 7).

Es gilt dabei, die geeignete Art des PCMs zu bestimmen und dessen Gehalt für die Anwendung zu optimieren. Gleichzeitig muss das Augenmerk auf eine eventuelle Korrosion des verwendeten Metalls durch die Anwesenheit von Salzverbindungen liegen.

Zusammenfassung

Das „Thermal Management“ in elektronischen Bauteilen, zunehmend auch in optoelektronischen, erfordert den Einsatz von verbesserten bzw. neuen Materialien, die ein hohes Maß an Zuverlässigkeit, sowie eine lange Lebensdauer dieser elektronischen Komponenten bei zum Teil extremen Anforderungen ermöglichen. Hierzu sind Werkstoffe mit einer möglichst hohen thermischen Leitfähigkeit und einer geringen und anpassbaren thermischen Ausdehnung erforderlich, die im elektronischen Package eingesetzt werden können. Metallische Kupfer-Verbundwerkstoffe, aber auch Werkstoffverbunde, bieten zur Problemlösung aussichtsreiche Ansätze, die Gegenstand zahlreicher F&E - Arbeiten waren und sind. Neben dem erreichbaren Eigenschaftsbild werden auch die Bauteilkosten entscheidend für die Anwendung derartiger Materialien sein. Auch deshalb werden pulvermetallurgische Verfahren zur endkonturnahen Bauteilfertigung hierbei eingesetzt.

Literatur

[1] U.S. Air Force Avionics Integrity Program notes (1989).
 [2] Bar-Cohen, A., A.D. Kraus, S.F. Davidson: Mech. Eng., June (1983).
 [3] Böhme, C.S., Dan R. White: Proc. Materials Week 2001, Internat. Congress on Adv. Materials, their Processes and

Applications, Proc. (2001), 1.
 [4] Upadhyaya, A., C. Ghosh: Powder Metallurgy Progress 2(2002)2, 98.
 [5] Jha, S.: PM2TEC2003, Las Vegas, Session 27.
 [6] Luedtke, A.: Tagungsband 14. Symp. Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Wien (2003) 797.
 [7] www.sylvania.com/pmc/chem/tungcopow.htm.
 [8] Zweben, C.: J. Metals (1998)50, 47.
 [9] www.ixiontm.com.
 [10] www.Electrovac.com.
 [11] Korb, G., W. Buchgraber, T. Schubert, Proceedings of the Electronic Manufacturing Technology Symposium IEMT Europe, Potsdam, Germany, 1998, 98.
 [12] Buchgraber, W., G. Korb, T. Schubert, B. Kempf: Proceedings of the EU-ROMAT conference, Sept. 27th – 30th, 1999, München, Germany.
 [13] Koráb, J., P. Sebo, P. Stefanik, S. Kaveck, G. Korb: Proc. ICCM-12 Europe, Paris, July 1999, CD.
 [14] Publishable Synthesis Report of BE Project BE 3876 CAFICOM, April (2000).
 [15] Neubauer, E. „Interface Optimisation in Copper-Carbon Metal Matrix Composites“, 2003, Ph.D. Thesis, ARC Seibersdorf Research GmbH, Seibersdorf, Austria.
 [16] Edtmaier, C., E. Wallnöfer: Tagungsband 14. Symp. Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Wien (2003) 533.
 [17] Weidmüller, H. u.a., Materials Science Forum, 2007, Vols. 534-536, 853.
 [18] Weber, L., C. von Grünigen, N. Frigeni: Tagungsband 14. Symp. Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Wien (2003) 802.
 [19] Yih, P., D.D.L. Chung: J. Mat. Sci. 32(1997), 2873.
 [20] Chang, S.-Y. u.a.: Met. Trans. 30A(1999), 1119.
 [21] www.sei.co.jp/pmp/contents_eng/seihin01_eng.html.
 [22] Sumitomo Electrical Industries: SEI News, June (2002).
 [23] Kerns, J.A., N.J. Colella, D. Makowiecki, H.L. Davidson: The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, 19 (1996) 3, 206.
 [24] Sauer, C.: Herstellung und mikrostrukturelle Beschreibung neuartiger Verbundwerkstoffe mit höchsten thermischen Leitfähigkeiten und optimierter thermischer Ausdehnung, DFG-Abschlussbericht (2002).
 [25] Schubert, Th., B. Trindade, T. Weißgärber, B. Kieback, Materials Science and Engineering A, im Druck.
 [26] Weißgärber, T., J. Schulz-Harder, H. Meyer, G. Lefranc, O. Stöcker: Conf. Proceedings, EuroPM 2001, Nizza, 4(2001), 33.
 [27] Weißgärber, T., J. Schulz-Harder, H. Meyer, G. Lefranc, O. Stöcker: Tagungsband, 5. Werkstofftechnisches Kolloquium, TU Chemnitz (2002).
 [28] Schubert, Th., H. Weidmüller, T. Weißgärber, B. Kieback, „Carbide formation in copper-carbon composites and its effect on thermal conductivity“ Proc. of the 2007 Int. Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials, Denver, USA (2007).
 [29] www.zae-bayern.de

(1) *Thomas Schubert, Hendrik Weidmüller, Thomas Weißgärber, Bernd Kieback, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Winterbergstr. 28, D-01277 Dresden*